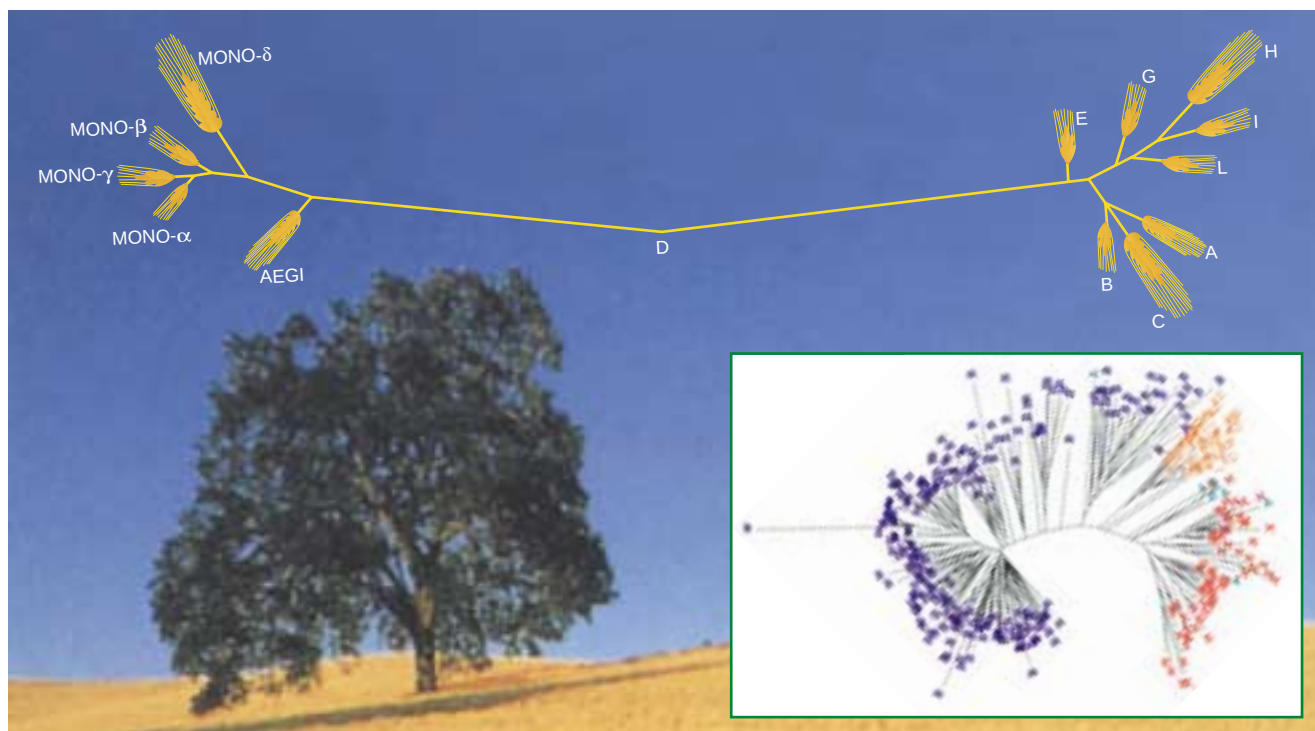




4. DANS CET ARBRE GÉNÉALOGIQUE du blé engrain, on tient compte des échantillons sauvages de *Triticum monococcum boeoticum* du Croissant fertile (groupes de A à L), des formes semi-sauvages des Balkans (AEGI), et des diverses variétés cultivées de blé engrain (groupes MONO de α à δ). Les formes cultivées de blé engrain proviennent de pays méditerranéens (α), d'Europe centrale (β), des Balkans (γ) et de la Turquie (δ). Les formes sau-

vages du groupe D sont sans conteste les ancêtres des formes cultivées. Un arbre plus précis (à droite) montre que tous les échantillons de variétés cultivées (en rouge) ou de formes semi-sauvages (en vert) appartiennent à un seul groupe généalogique qui se distingue des variétés sauvages (en bleu). À une distance génétique intermédiaire entre les formes cultivées et les formes sauvages, s'insèrent les lignées sauvages des monts Karaca Dag (en orange).

Des expériences et des vérifications ultérieures ont exclu les blés sauvages récoltés dans les zones d'habitat secondaire de la généalogie des blés engrains cultivés, et l'analyse des 19 échantillons du groupe D a déterminé les 11 qui sont les plus proches des variétés cultivées.

La confirmation archéologique

Ainsi la biologie moléculaire désignait clairement les ancêtres sauvages des espèces cultivées ! Des témoignages fossiles de blés domestiqués au Néolithique existaient-ils dans la zone localisée par la génétique ? Des recherches archéologiques autour des montagnes du Karaca Dag, notamment les sites de Cafer Höyük, Nevalı Cori et Cayönü (voir la figure 2), ont mis au jour des grains de blé engrain sauvage et cultivé.

Les archéologues datent la culture de cette espèce entre 9 700 et 7 500 avant notre ère. À cette période, les grains de blé engrain sauvage étaient probablement rassemblés dans différentes localités et transportés jusqu'aux campements, tels ceux découverts dans le Nord de la Syrie, à Abu Hureyra et Murey-

bit, avant le début de la culture du blé dans ces localités.

Les populations qui vivaient il y a 9 000 ans dans ces zones montagneuses du Kurdistan ont sans doute contribué à la fondation de l'agriculture mésopotamienne. Depuis nos résultats, certains archéologues ont relancé la candidature de la vallée du Jourdain. Toutefois, l'absence d'ancêtres sauvages du blé engrain dans cette zone contredit cette hypothèse. La découverte des ancêtres d'une espèce

cultivée, tel que le blé engrain, qui s'est séparée d'eux il y a 9 500 ans, n'a été possible que grâce au nombre réduit de gènes responsables des différences morphologiques évidentes entre les formes cultivées et les formes sauvages. En termes génétiques, le processus de domestication de l'espèce a donc été relativement simple. Peut-être cette plante mériterait-elle d'être aujourd'hui à nouveau cultivée : ses résistances au stress et aux maladies pourraient être alors transmises aux blés cultivés.

Francesco SALAMINI travaille à l'Institut Max Planck de Cologne et est professeur à l'Université de Cologne.

D. ZOHARY et M. HOPE, *Domestication of Plants in the Old World in the Origin and Spread of Cultivated Plants in West Asia, Europe, and the Nile Valley*, 2^e édition, Clarendon Press, Oxford, UK, 1993.

D. SMITH BRUCE, *The Emergence of Agriculture*, Scientific American Library, New York, 1995.

B. BORGHI, R. CAZSTAGNA, M. CORBELLINI, M. HEUN, et F. SALAMINI, *Breadmaking Quality of Triticum mono-*

coccum monococcum, in *Cereal Chemistry*, 73, 2, pp. 208-214, 1996.

S. PADULOSI, K. HAMMER et J. HELLER (a cura???), *Hulled Wheats. Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops*, in *Proceeding of the First International Workshop on Hulled Wheats*, 21-22 juillet 1995, Castelvecchio Pascoli, International Plant Genetic Resources Institute, Rome, 1996.

M. HEUN, R. SCHFER-PREGL, D. KLA-WAND, R. CASTAGNA, M. ACCERBI, B. BORGHI et F. SALAMINI, *Site of Einkorn Wheat Domestication Identified by DNA Fingerprinting*, in *Science*, n° 278, novembre 1997.

Flambées d'étoiles dans les galaxies naines

SARA BECK

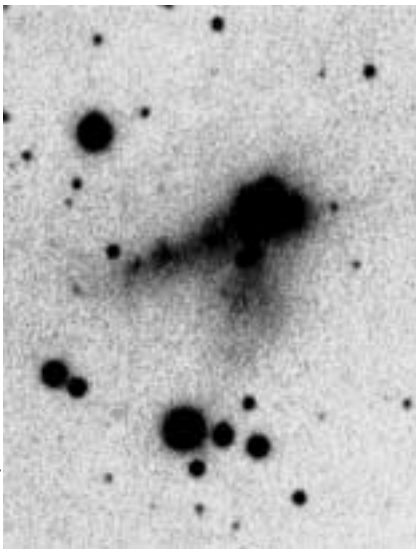
Dans des galaxies minuscules, les étoiles naissent parfois par bouffées spectaculaires. Ces flambées stellaires renseignent sur l'histoire des débuts de l'Univers.

À 12 millions d'années-lumière de la Terre se trouve Messier 83, une majestueuse galaxie spirale barrée. En l'examinant de près, on remarque, à sa périphérie, une petite nébuleuse quasi elliptique : c'est la galaxie naine NGC 5253, qui semble n'être qu'un compagnon insignifiant de Messier 83. Les apparences sont trompeuses : dans cette

petite galaxie, les étoiles naissent à un rythme considérable.

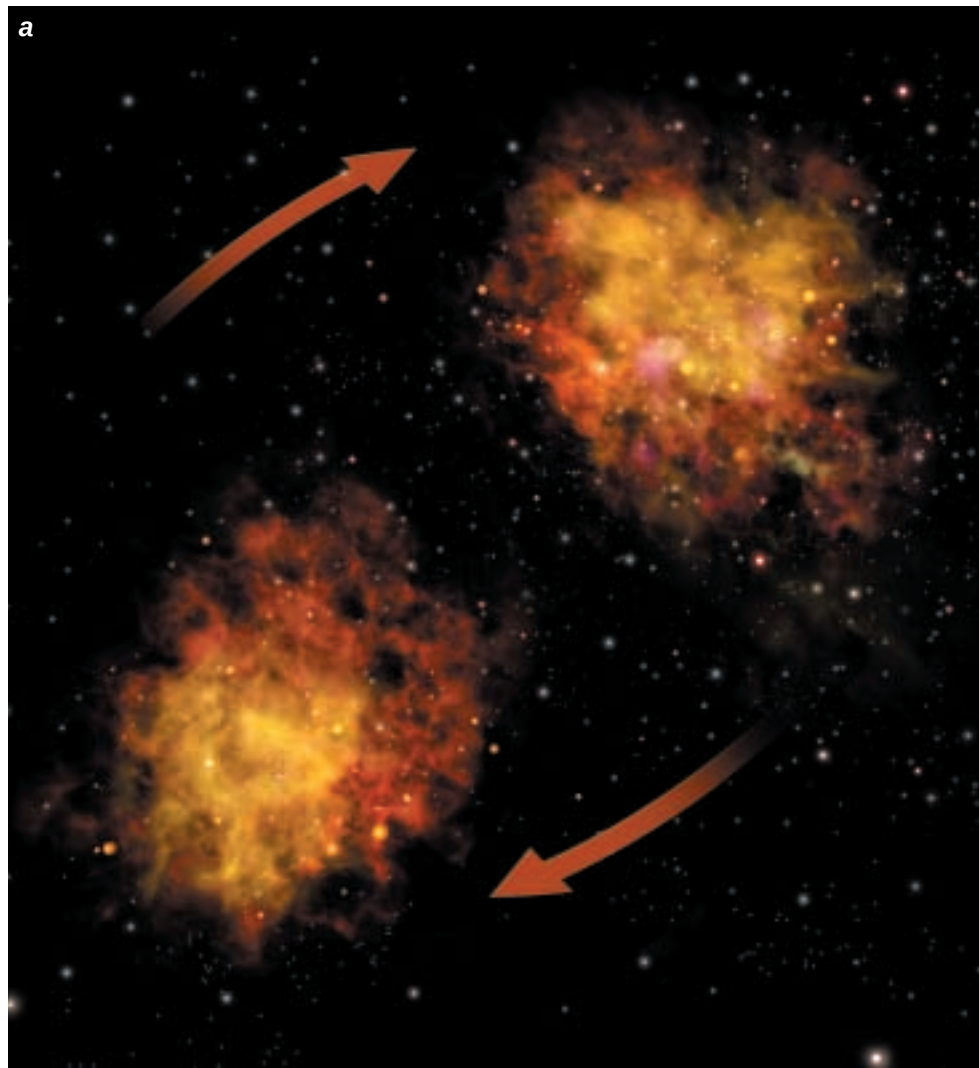
Ces dernières années, les astronomes ont découvert que les galaxies naines comme NGC 5253 sont plus nombreuses qu'ils ne le supposaient. De surcroît, ces galaxies diffèrent de leurs grandes cousines : elles restent calmes pendant des milliards d'années, puis des étoiles s'y forment par bouf-

fées. Les grandes galaxies sont également le siège de telles flambées stellaires ou sursauts de formation d'étoiles, mais le rayonnement émis est souvent masqué par les autres émissions galactiques. Aussi les galaxies naines sont-elles de remarquables systèmes pour l'étude de ce phénomène mystérieux. Vestiges d'une époque reculée, ces galaxies détiennent éga-



Alfred T. Kamajian/AURA/NOAO/NSE

1. LES FUSIONS de galaxies déclenchent des sursauts de formation stellaire. Ici on a modélisé l'évolution de la galaxie naine à sursauts II Zwicky 40. Dans la première étape (a), deux galaxies naines composées de vieilles étoiles rouges et de nuages de gaz atomique (en jaune) s'approchent, mutuellement attirées par la gravitation, et se mettent en orbite. Au cours de leur coalescence, des queues de gaz et des étoiles sont étirées (b) et des concentrations de jeunes étoiles bleues se forment. L'étape finale (c) correspond à la galaxie fusionnée telle qu'on la voit aujourd'hui sur les images des télescopes (ci-dessus).



b



c



lement des secrets de l'histoire de l'Univers primordial, car les matériaux qui les composent ont peu changé depuis le Big Bang.

Quelles sont les causes des flambées stellaires dans les galaxies naines ? Pourquoi les astronomes leur accordent-ils tant d'importance ? Pour répondre à ces questions, examinons les mécanismes de formation des étoiles. Depuis le début de l'Univers, des étoiles se forment. La Voie lactée, cette grande galaxie spirale dont la seule particularité est de contenir le Système solaire, en renferme au moins 100 milliards. La formation stellaire y est lente et régulière ; elle résulte de la contraction de vastes nuages de gaz et de poussières interstellaires. Chaque année, en moyenne, une masse solaire environ de gaz et de poussières se transforme en nouvelles étoiles. En revanche, les sursauts stellaires se déroulent sur une période relativement courte (entre 1 et 20 millions d'années), pendant laquelle les étoiles se forment plus vite que la moyenne, jusqu'à 100 fois plus vite que dans la Voie lactée. Ces périodes sont nécessairement courtes : après quelques centaines de millions d'années de ce régime, la galaxie épuiserait toute sa réserve de gaz.

Les flambées stellaires augmentent considérablement la luminosité des galaxies. Lors de ces brefs épisodes, le rayonnement émane surtout de jeunes étoiles chaudes de 20 masses solaires ou davantage, dont la durée de vie ne dépasse guère quelques millions d'années (plus une étoile est massive, moins longtemps elle vit). Ces étoiles, chacune des dizaines de milliers de fois plus brillantes que le Soleil, chauffent et ionisent les nuages denses de poussières et de gaz à partir desquels elles se forment ; ces nuages absorbent les rayonnements visibles et ultraviolets de l'étoile, puis réémettent cette énergie sous forme de rayonnement radio ou infrarouge, que les astronomes détectent. Parfois, la luminosité des sursauts stellaires atteint presque celle des quasars, les objets les plus lumineux de l'Univers.

Les flambées d'étoiles jouent un rôle crucial dans l'évolution des galaxies. Aussi les astronomes étudient-ils les causes de leur déclenchement, leur déroulement et leur apaisement. Ces questions sont sans doute plus faciles à élucider dans les galaxies naines, qui ne contiennent pas plus

de 100 millions d'étoiles, que dans les grandes galaxies spirales comme la Voie lactée ou Messier 83.

Un déluge de naines

Comme la plupart des galaxies naines sont très peu lumineuses, les astronomes ne peuvent les étudier que depuis quelques années. Les deux galaxies naines les plus connues sont les deux Nuages de Magellan, le Grand et le Petit, qui nous apparaissent brillants parce qu'ils sont « proches » de notre Galaxie (ils sont à moins de 300 000 années-lumière, visibles dans le ciel austral). Aucune autre galaxie naine n'est visible à l'œil nu, mais, grâce aux nouveaux télescopes, équipés de détecteurs sensibles, nous savons désormais que les galaxies naines sont bien plus nombreuses que les grandes galaxies. Le Groupe local, l'amas de galaxies où se trouve la Voie lactée, ne contient (au dernier recensement) que deux grandes spirales (la Voie lactée et Andromède) pour une quarantaine de galaxies naines. Cette proportion se retrouve probablement pour la majeure partie de l'Univers proche.

Certaines galaxies naines ont une forme elliptique et, parmi celles-ci, les plus petites et les moins brillantes sont nommées naines sphéroïdales. Cependant, la plupart des galaxies naines n'ont pas de structure ou de forme

simple. Les observateurs leur ont attribué des surnoms. On parle de « grosses gouttes » ou d'« œufs au plat », ce qui donne une idée de leur apparence typique ; la nomenclature officielle est « galaxies naines irrégulières ».

Les galaxies naines ne sont pas des grandes galaxies en miniature : elles évoluent par des mécanismes différents. Ainsi, les grandes galaxies spirales contiennent des nuages géants d'hydrogène moléculaire (H_2), d'hélium et de poussières qui se contractent lentement et forment des étoiles. Les bras spiraux résultent d'ondes de densité, les étoiles se trouvant dans le creux de l'onde. Le passage de ces ondes déclenche la formation d'étoiles en comprimant les nuages moléculaires qu'elles traversent. Les galaxies spirales ne sont ainsi jamais complètement au repos : des étoiles y naissent en permanence.

À l'inverse, les galaxies naines contiennent peu d'hydrogène moléculaire, mais beaucoup d'hydrogène atomique, c'est-à-dire des atomes d'hydrogène libres, non appariés. La masse des nuages d'hydrogène atomique y est dix fois supérieure à celle des étoiles. Toutefois, leur densité est inférieure à celle des nuages d'hydrogène moléculaire : la contraction sous l'action des forces de gravitation est plus lente, et les étoiles se forment plus rarement. De surcroît, aucune onde de densité ni aucun déplacement organisé de gaz ne



2. LES GALAXIES NAINES À SURSAUTS, telle NGC 4214 (a), contiennent des concentrations de jeunes étoiles bleues, entourées de nuages de gaz ionisés rougeoyants. Des flambées d'étoiles sont également visibles dans la galaxie naine NGC 2366 (b) ; un gros plan pris par le télescope spatial Hubble montre un amas dense d'étoiles massives enfouies

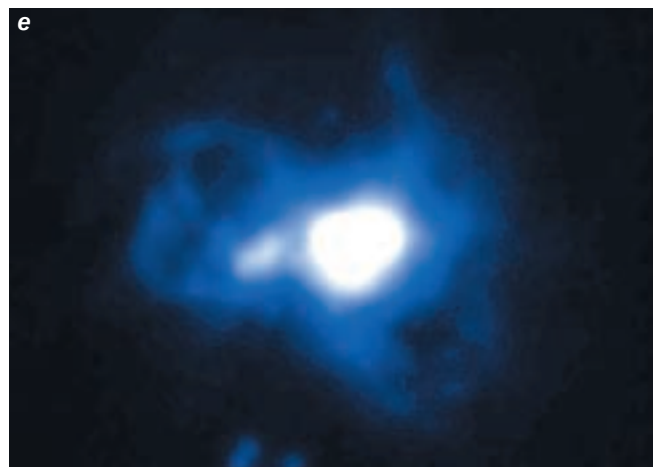
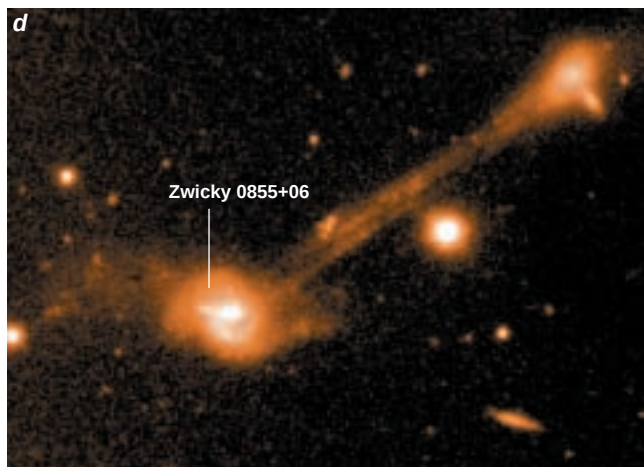
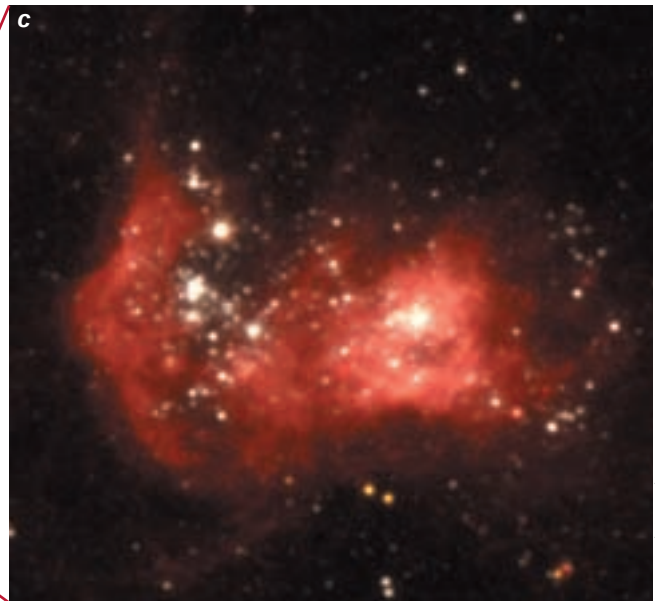
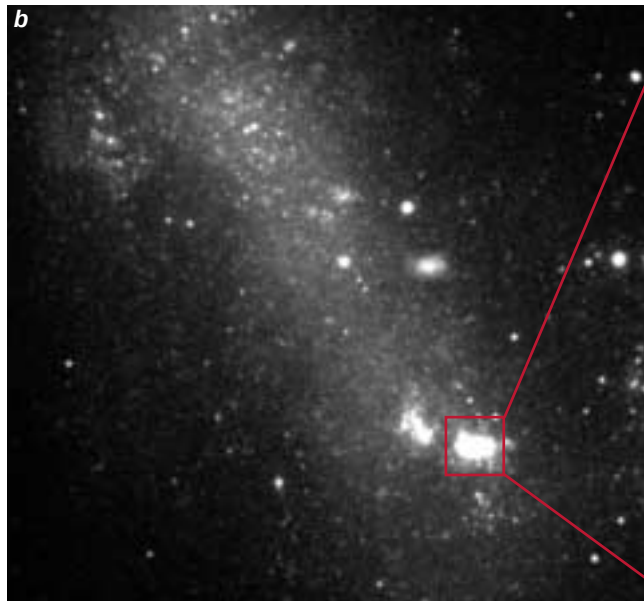
déclenchent l'effondrement des nuages. Les naines restent calmes l'essentiel de leur existence : durant ces périodes, les astres qui meurent ne sont pas remplacés, et seules subsistent des étoiles relativement vieilles, rouges et faiblement lumineuses. Seules les galaxies naines où flambent les étoiles abritent des étoiles lumineuses, chaudes et bleues, récemment formées.

Les astronomes n'observent évidemment pas l'évolution des galaxies naines : ils en voient certaines qui sont actives et d'autres qui sont calmes. En revanche, l'étude de la composition chimique des galaxies naines montre que chaque galaxie naine passe successivement par ces deux états. La formation d'étoiles modifie la composition des galaxies : lorsque les étoiles massives arrivent en fin de vie, elles explo-

sent violemment, dispersent dans le gaz galactique environnant les éléments lourds formés en leur sein, au cours de leur vie, par les réactions nucléaires. À l'inverse, quand aucune étoile ne naît au sein de la galaxie, la composition chimique de cette dernière n'évolue pas. Ainsi, dans une galaxie, la proportion d'éléments plus lourds que l'hydrogène (ce que les astronomes nomment improprement «métaux») révèle l'histoire de celle-ci. Plus la proportion d'hydrogène est élevée, moins la galaxie est évoluée.

Or, dans les galaxies naines, la proportion d'éléments plus lourds que l'hydrogène est comprise entre 2 et 30 pour cent de sa valeur au voisinage du Soleil (la moyenne est de dix pour cent). Seules un petit nombre de galaxies naines à sursauts très actifs

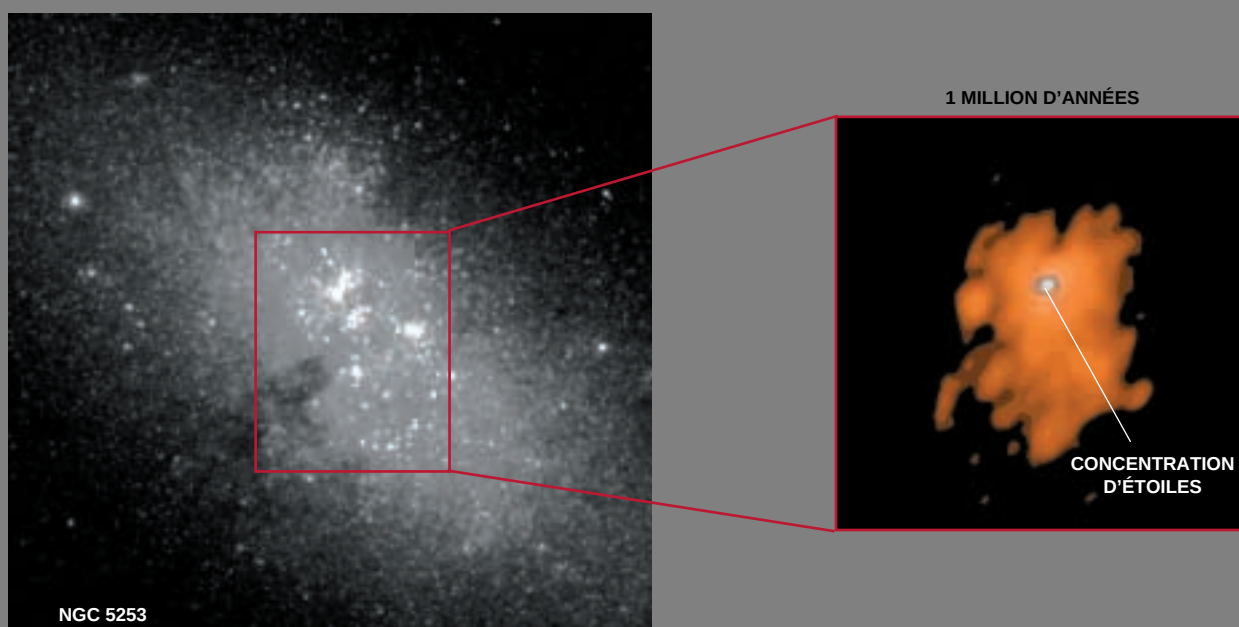
ont une proportion en éléments lourds comparable à celle des galaxies spirales. Comme la plupart des galaxies naines ont peu évolué, les astronomes espèrent en trouver une qui soit véritablement primordiale, c'est-à-dire inchangée depuis le Big Bang. Parmi les galaxies naines connues, les deux qui ont la plus faible proportion en éléments lourds sont I Zwicky 18 et SBS 0335-052. Toutefois, même celles-ci ne paraissent pas primordiales, et plusieurs épisodes de formation stellaire semblent s'y être déroulés (on y a détecté des populations stellaires d'âges distincts). En attendant la découverte d'une galaxie vraiment primordiale, les cosmologistes étudient les galaxies naines pour tenter de comprendre comment sont nées les premières générations d'étoiles.



dans un nuage de gaz (c). Le sursaut d'étoiles dans la galaxie naine Zwicky 0855+06 (d) résulte apparemment d'une rencontre proche avec une autre galaxie naine, qui aurait également formé le pont d'étoiles qui les relie. La galaxie naine à sursauts Henize 2-10 (e) a

un filament de gaz qui indique l'assimilation ancienne d'une galaxie plus petite. Henize 2-10 possède aussi des coquilles constituées de gaz rejeté par les jeunes étoiles massives qui faisaient partie de sursauts stellaires.

NASA/Space Telescope Science Institute (NGC 4214 et NGC 2366 close-up, CHT (NGC 2366), David Martínez et César Esteban Instituto de Astrofísica de Canarias (Zw 0855+06 et Henize2-10)



3. LE SURSAUT STELLAIRE, au centre de la galaxie NGC 5253 (*ci-dessus*, à gauche), s'est apparemment déclenché quand la galaxie a absorbé un nuage de gaz intergalactique. La région la plus jeune

du sursaut, âgée de moins d'un million d'années, n'est visible que sur les images radio et infrarouges (*ci-dessus*, à droite), car ses étoiles sont encore enfouies dans la nébuleuse où elles se sont formées.

Feu d'artifice stellaire

Les flambées d'étoiles donnent aux galaxies naines une apparence caractéristique : elles contiennent alors des concentrations de jeunes étoiles, bleues et chaudes, taches brillantes plus ou moins structurées, entourées d'une enveloppe moins brillante d'étoiles rouges et froides, plus âgées. Au cours des sursauts stellaires importants, la luminosité des galaxies naines augmente au point d'égaliser celle des grandes galaxies spirales (au repos, la luminosité n'est que de un pour cent de cette valeur). Cette activité stellaire est concentrée dans une petite zone, de diamètre compris entre quelques centaines et un millier d'années-lumière (les galaxies naines ont généralement un diamètre inférieur à 6000 années-lumière). Chaque concentration contient des centaines d'étoiles brillantes, parfois des dizaines de milliers. Au cours d'un épisode de sursaut stellaire, plusieurs zones actives peuvent coexister ; elles sont rarement au centre de la galaxie.

Contrairement à la Voie lactée et aux autres grandes galaxies, tous les âges d'étoiles ne sont pas représentés dans les galaxies naines à sursauts : celles-ci ne contiennent en général que des concentrations de très jeunes étoiles et une enveloppe constituée d'étoiles plus âgées de quelques milliards d'années. Les astronomes esti-

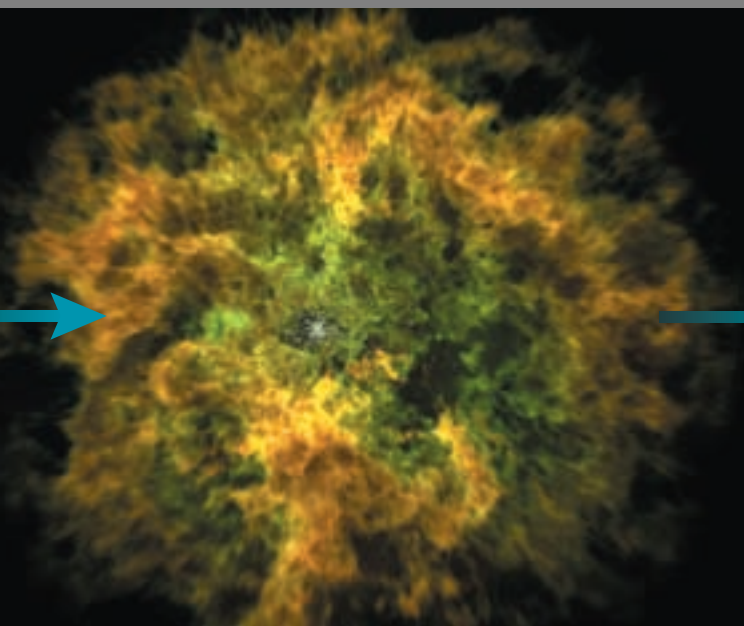
ment l'âge des populations stellaires dans ces galaxies en cherchant des phases caractéristiques de l'évolution stellaire. L'identification d'une phase de Wolf-Rayet, que seules les étoiles très massives (plus de 25 masses solaires) atteignent quand elles ont entre deux et dix millions d'années, est sans doute l'un des moyens diagnostiques les plus efficaces. Durant cette phase de leur développement, les étoiles éjectent la plus grande partie de leur masse initiale à des vitesses de quelques milliers de kilomètres par seconde. Cet état s'observe d'après les longueurs d'onde des rayonnements émis par des ions éjectés : l'effet Doppler (l'effet qui fait paraître plus aigu le son d'une ambulance qui approche, et plus grave le son quand le véhicule s'éloigne) élargit les raies observées ; au lieu d'apparaître sur le spectre comme de fines bandes, elles s'étalent vers le rouge et vers le bleu. Lorsque les astronomes repèrent un tel élargissement dans le spectre émanant d'une flambée d'étoiles, ils savent que cette zone contient des étoiles de Wolf-Rayet en grand nombre et que la population stellaire de cette zone ne peut avoir plus de dix millions d'années.

Dans les grandes galaxies, les régions de sursauts se superposent souvent au noyau galactique brillant ou à un bras spiral de la galaxie, ce qui rend leur observation plus difficile. De surcroît, le rayonnement engendré par

l'activité régulière de la galaxie se distingue difficilement des émissions propres aux flambées stellaires. Ce problème est particulièrement gênant dans la bande radio du spectre. Nous l'avons vu, les jeunes étoiles massives formées dans des concentrations ionisent les nuages de gaz environnants. Ces nuages engendrent alors des émissions radio avec un spectre thermique (l'intensité des émissions varie en fonction de la fréquence de manière caractéristique). Lorsque les étoiles massives finissant par s'effondrer forment des supernovae, les vestiges de l'explosion émettent des ondes radio avec un spectre non thermique. Le spectre radio d'une grande galaxie est donc une combinaison du rayonnement thermique de la plus jeune génération d'étoiles massives et du rayonnement non thermique des générations passées. Toutefois, le rayonnement non thermique est souvent plus intense et plus durable que le rayonnement thermique. Ainsi, dans une grande galaxie, les émissions caractéristiques des sursauts stellaires sont souvent masquées par les autres émissions.

À l'inverse, les galaxies naines ne sont pas le siège de cette formation permanente d'étoiles, et les régions de formation stellaire se repèrent aisément. Pour les galaxies naines à sursauts NGC 5253 et II Zwicky 40, par exemple, on ne voit que les émissions thermiques des étoiles jeunes, car la contribution

10 MILLIONS D'ANNÉES



PLUSIEURS MILLIARDS D'ANNÉES



NASA/STScI (galaxy and globular cluster images) ; J. L. Turner (radiofrequency image) ; Zhen Goujian et Vanujan Goujian (NASA/ESA Hubble Space Telescope artist's rendering)

Les astronomes pensent qu'après dix millions d'années les vents stellaires balaieront cette enveloppe de gaz, comme sur cette extrapolation d'artiste (*ci-dessus, à gauche*) ; après plusieurs milliards

d'années, la région de sursauts d'étoiles évoluera en amas globulaire, ressemblant peut-être alors à l'amas NGC 6093 dans notre propre Galaxie (*ci-dessus, à droite*).

radio des sursauts antérieurs s'est estompée. L'absence d'émission non thermique permet d'établir un âge : elle signifie qu'aucune des étoiles de la zone du sursaut n'est encore devenue une supernova, et l'âge du sursaut est nécessairement inférieur à la durée de vie de ces étoiles massives (quelques millions d'années). Cette estimation corrobore d'autres observations qui indiquent que les sursauts stellaires de NGC 5253 et de II Zwicky 40 sont les plus jeunes connus.

La composante la plus jeune du sursaut stellaire de NGC 5253 n'apparaît pas en lumière visible, car elle est toujours enfouie dans le nuage de gaz et de poussières qui l'a engendrée. Cependant, une étude détaillée a montré que les émissions radio et infrarouges proviennent d'une source très compacte, vraisemblablement un regroupement de 100 000 étoiles extrêmement jeunes, concentrées dans une région d'un diamètre de trois à six années-lumière seulement. Le contenu et la taille de cette région rappellent ceux des amas globulaires, ces assemblages d'étoiles denses et sphériques que l'on observe dans la Voie lactée et dans les autres grandes galaxies.

Les amas globulaires de la Voie lactée ont plusieurs milliards d'années au moins et contiennent les étoiles les plus âgées de la Galaxie. Aussi conclut-on, soit que notre Galaxie n'a pas formé d'amas globulaires depuis des milliards

d'années, soit que tous les amas globulaires récents ont été disloqués par des effets gravitationnels, au cours de leur rotation dans le disque galactique. Les sursauts stellaires de NGC 5253 et d'autres galaxies naines semblent être des amas globulaires en formation. Si c'est le cas, les astronomes accèderaient à des aspects cachés de l'histoire de notre propre Galaxie.

N'oublions pas, toutefois, que les galaxies naines diffèrent des grandes galaxies. Les zones de formation d'étoiles se «propagent» différemment à travers ces galaxies, et la répartition apparemment aléatoire des zones de sursauts dans les galaxies naines soulève une question : comment la formation stellaire se propage-t-elle quand une galaxie n'a ni bras spiraux ni aucune autre forme d'organisation du mouvement du gaz ? Aujourd'hui, les astronomes supposent une «formation stellaire stochastique par autopropagation» : la présence d'un sursaut de formation stellaire dans une région de la galaxie déclenche des sursauts secondaires dans d'autres régions, parce que les jeunes étoiles massives du centre d'activité initial perturbent le gaz des régions adjacentes par l'intermédiaire de vents stellaires ou de rayonnements ; le gaz voisin s'effondre alors et amorce son propre sursaut, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'y ait plus assez de gaz susceptible d'être per-

turbé par les jeunes étoiles. Cette théorie décrit bien la progression de la formation stellaire dans les galaxies naines, mais elle n'est probablement pas transposable aux galaxies spirales. De surcroît, elle ne dit pas pourquoi le sursaut initial se produit.

Le déclenchement des flambées stellaires est mystérieux, tant pour les grandes galaxies que pour les galaxies naines, mais on soupçonne des mécanismes différents selon le type de galaxie. Les galaxies naines à sursaut les mieux étudiées semblent liées à d'autres objets astronomiques par des phénomènes d'interaction, de fusion ou d'absorption. Par exemple, II Zwicky 40 est apparemment constituée de deux galaxies naines en train de fusionner (*voir la figure 1*). Les astronomes ont également bien étudié Henize 2-10, une assez grosse galaxie naine où l'on observe un sursaut stellaire avancé (il aurait commencé il y a environ dix millions d'années). On suppose que cette galaxie a avalé une galaxie beaucoup plus petite, il y a 100 millions d'années environ. La petite galaxie a été bien assimilée : il ne subsiste qu'une traînée de gaz due aux effets de marées et qui dépasse encore de Henize 2-10 (*voir la figure 2e*). Enfin la galaxie naine à sursauts Zwicky 0855 +06 interagit avec une autre naine (sans sursauts) qu'elle déforme. Les exemples d'interactions sont nombreux.

Naines bleues compactes

Les galaxies naines à flambée de formation stellaire, aussi connues sous le nom de galaxies naines bleues compactes, en raison de leur couleur et de leur morphologie, intriguent à plus d'un titre. D'abord, certaines d'entre elles, comme 1 Zwicky 18 ou SBS 0335-052, situées à moins de 200 millions d'années-lumière, ont une teneur en éléments lourds très faible. Chimiquement peu évoluées, elles semblent être des galaxies jeunes, voire primordiales. Ainsi Trinh Xuan Thuan, de l'Université de Virginie, et Yuri Izotov, de l'Observatoire d'Ukraine, leur attribuent un âge inférieur à 100 millions d'années. Si tel est le cas, les galaxies bleues compactes peu évoluées proches, accessible à nos instruments d'observation, pourraient être des galaxies en train de naître. Les galaxies en formation sont généralement cherchées dans l'Univers jeune, donc lointain et, compte tenu de leur distance, elle paraissent extrêmement faibles, même sur les images obtenues avec les télescopes les plus puissants.

La longue gestation de galaxies telles 1 Zwicky 18 ou SBS 0335-052, dont la naissance aurait été repoussée de plusieurs milliards d'années, laisse toutefois perplexe. Leur âge a d'ailleurs été récemment remis en question : le fait qu'elles soient peu évoluées chimiquement n'implique pas forcément qu'elles soient jeunes. Des astronomes de l'Institut d'astrophysique de Paris ont mis en évidence, dans l'une des galaxies prétendues jeunes, la présence d'étoiles plus vieilles qu'un milliard d'années, en contradiction avec leur âge supposé de 100 millions d'années. De surcroît, ils ont montré qu'une très faible teneur en éléments lourds restait compatible avec une histoire de formation stellaire qui s'étalerait sur une dizaine de milliards d'années, marquée par une alternance de périodes calmes et de sursauts d'activité stellaire.

Autre surprise dans ces galaxies bleues compactes : le gaz, l'un des constituants galactiques majeurs, y semble absent. Outre les populations stellaires, une galaxie possède le plus souvent des réserves de gaz sous forme d'hydrogène atomique et moléculaire. Or jusqu'à présent, cette composante moléculaire n'a jamais été détectée dans les galaxies à flambées les plus emblématiques. Dans notre propre Galaxie, les étoiles se forment dans de vastes complexes moléculaires. Les mécanismes de formation diffèrent-ils dans les naines les plus pauvres en éléments lourds et dans les galaxies spirales classiques ?

En plus de la matière lumineuse, les galaxies naines, plus encore que les galaxies plus massives, possèdent de grandes quantités de matière noire dont la présence est révélée de manière indirecte par des études dynamiques. Il a été envisagé qu'une partie de cette dernière composante soit constituée de gaz moléculaire diffus, difficilement décelable. Les dernières données d'Alfred Vidal-Madjar et de ses collaborateurs de l'Institut d'astrophysique et de l'Observatoire de Paris viennent d'infirmer cette hypothèse. Les astronomes devront chercher une autre forme de matière noire.

Enfin, comment se déclenchent ces flambées phénoménales observées dans les galaxies bleues compactes ? Une collision de galaxies est un mécanisme souvent avancé pour expliquer les sursauts de formation stellaire dans les galaxies massives. En raison de leur faible masse, les galaxies naines sont très fragiles. Une rencontre avec une galaxie compagnon a ainsi un impact majeur sur son évolution : si, dans un premier temps, cette rencontre peut engendrer un regain d'activité stellaire, à plus long terme, elle risque de lui être fatale. En 1994, une telle galaxie naine en cours de destruction a été découverte dans la constellation du Sagittaire, aux confins de notre Voie lactée.

Fossoyeurs de galaxies, les interactions entre galaxies peuvent aussi en créer. Ainsi les galaxies naines «de marées» se forment à partir de matériaux expulsés dans le milieu intergalactique par des effets gravitationnels qui s'exercent lors de collisions violentes. Toutefois, contrairement aux naines de marées ainsi qu'aux naines plus évoluées, les galaxies bleues compactes ont tendance à être isolées, même si certaines possèdent des compagnons peu massifs. Leur mode de formation et leur évolution demeurent largement méconnus.

Pierre-Alain DUC, Service d'astrophysique, CEA-CNRS, Saclay.

Rencontres de naines

Les rencontres de galaxies peuvent également déclencher des sursauts stellaires, même dans les grandes galaxies. Les étoiles déjà formées ne sont pas perturbées, car elles entrent rarement en collision tant sont grandes les distances qui les séparent, même dans les zones galactiques les plus peuplées. Toutefois, les nuages de gaz sont spectaculairement modifiés : des ondes de choc ou des contraintes gravitationnelles les fragmentent et les aggrègent en étoiles. Ces mécanismes devraient fonctionner dans les galaxies naines aussi bien que dans les galaxies plus grosses.

Toutefois la plupart des flambées d'étoiles dans les galaxies naines ne résultent pas d'une interaction avec une autre galaxie naine, mais plutôt de rencontres avec des systèmes plus petits et moins brillants. Si les galaxies naines sont les petits poissons de la mare céleste, de quelle friture se nourrissent-ils ? Certains astronomes pensent que les galaxies naines interagissent avec des nuages de gaz atomique (essentiellement de l'hydrogène) dont les masses sont comprises entre un million et dix millions de masses solaires. Par exemple, NGC 5253 pourrait avoir absorbé un petit nuage de gaz de un million de masses solaires. Les astronomes ont cherché, à l'aide de radiotélescopes très sensibles, des nuages de gaz intergalactiques qui émettraient la signature caractéristique de l'hydrogène atomique, plus facile à détecter que l'hydrogène moléculaire. Ils ont découvert que les galaxies naines à sursauts stellaires ont plus souvent de tels nuages comme compagnons que les galaxies naines sans sursauts.

L'hypothèse d'interactions galactiques pour expliquer les flambées stellaires corrobore les observations de sursauts sporadiques, très espacés dans le temps.

Pourquoi les sursauts cessent-ils ? On répondra peut-être à cette question en observant que la plupart des galaxies naines à sursauts renferment de grandes structures de gaz ionisé en forme de coquilles, de bulles, de halos ou de cheminées. Ces structures révèlent la grande activité des jeunes étoiles massives, qui évacuent quantité de gaz. Les plus massives passeraient par la phase Wolf-Rayet et mourraient alors sous

forme de supernovae. Les coquilles et les bulles des naines à sursauts sont très vraisemblablement des accumulations de vestiges de vents émanant d'étoiles de Wolf-Rayet et de matière éjectée par les supernovae.

Toutes les jeunes étoiles massives perdent violemment de la masse, qu'elles soient ou non dans des galaxies naines. Dans les grandes galaxies à sursauts, on observe également des bulles, des panaches et des filaments ionisés. Toutefois, dans les galaxies naines, ces structures sont plus étendues hors de la galaxie que dans les grands systèmes : la masse réduite – et la gravité inférieure – des galaxies naines permet au gaz rejeté de s'éloigner davantage de la galaxie, voire de s'en échapper complètement. Ainsi les flambées d'étoiles cessent parce que l'activité stellaire perturbe le gaz interstellaire qui alimente la formation des étoiles. Les moins massives des étoiles formées pendant le sursaut stellaire ne deviennent pas des supernovae, mais se mêlent aux étoiles rouges peu brillantes qui constituent l'enveloppe de la galaxie naine. La galaxie retrouve ensuite son calme : la naine active se transforme en une naine irrégulière ordinaire, en attendant la prochaine rencontre avec un nuage.

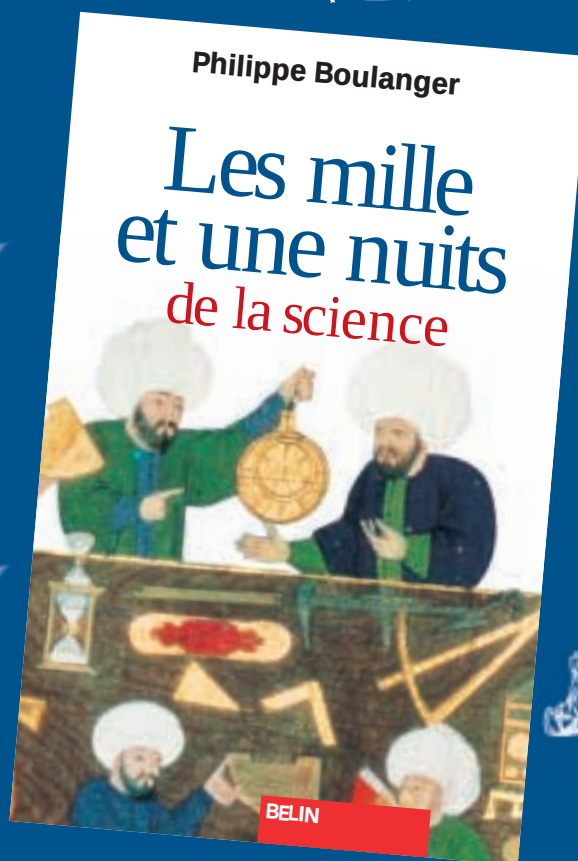
L'intérêt pour les galaxies naines à sursauts se renforce à mesure que les moyens d'observation se perfectionnent. Les grands télescopes en lumière visible et en infrarouge, dans l'espace ou au sol, les réseaux qui détectent les ondes millimétriques et radio, et les satellites d'observation des hautes énergies nous ont déjà montré la formation d'étoiles dans les galaxies naines avec une résolution sans précédent. En observant ces systèmes dynamiques, les astronomes étudient des phénomènes uniques dans l'Univers. Les petits paquets renferment parfois des trésors : les naines à sursauts en sont une excellente illustration.

Sara BECK est maître de conférences à l'École de physique et d'astronomie de l'Université de Tel Aviv et chercheur associé de l'Université de Boulder.

J. BARNES, L. HERNQUIST et F. SCHWEIZER, *Les collisions de galaxies*, in *Pour la Science*, n° 168, octobre 1991.

Galaxies, sous la direction de Karel A. van der Hucht et al., IAU series, vol. 193, Astronomical Society of the Pacific, 1999.

**Entrez dans l'ambiance orientale
des mille et une nuits et laissez-vous
charmer par l'imagination
de Shéhérazade contant la science
et les tribulations des savants**



«Dans ce livre, Philippe Boulanger, Directeur de la revue Pour la Science, réussit le tour de force de vulgariser des concepts difficiles en charmant son lecteur par une subtile danse... des neurones».

**Hervé Ponchelet
Le Point**

**Code 2445 • 240 pages • Prix 100 F
Voir bon de commande p.90**

BELIN • POUR LA SCIENCE

